

Вадим ОРЕЛ*

ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА ДІЛЯНКАХ РАПТОВОГО РОЗШИРЕННЯ ПОТОКУ У ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ

At transportation of liquids and gases in pipeworks with sudden expansions the losses of energy as specific capacity on overcoming of hydraulic resistance are calculated.

У технологічних процесах різних галузей промисловості широко використовуються рідинні та газові потоки, на створення яких витрачається енергія [1]. Зниження втрат енергії в системах трубопровідного транспорту досягається зменшенням опору, що для труб, які виконують транспортні функції, є головним завданням [2]. Потоки в трубопроводах, як правило, турбулентні, і тому навіть невелике зменшення їхнього опору дає значний економічний ефект. У багатьох країнах світу (в тому числі в Україні) ведуться роботи, направлені на зменшення опору при транспортуванні рідин і газів, бо підтримання, а тим паче збільшення темпів економічного розвитку країни вимагає, зокрема, вдосконалення енергозбереження [3].

За вимірними витратою рідини Q та перепадом тиску Δp на робочій ділянці труби довжиною ℓ та площею поперечного перерізу ω пропонується [4] визначати питому потужність на подолання опору:

$$\overline{W} = \frac{\Delta p \cdot Q}{\ell \cdot \omega} = \frac{dp}{dx} \cdot V, \quad (1)$$

де $\frac{dp}{dx}$ – градієнт тиску; V – середня швидкість руху рідини, що обчислена за витратою.

Цій формулі надається перевага тому, що вона має фізичний зміст, оскільки величина $\overline{W}$ – це середня енергія, що підводиться на робочій ділянці в одиницю об'єму рідини за одиницю часу за рахунок роботи сил тиску [4].

Формула (1) використовувалась при течії рідини в трубах з постійною площею поперечного перерізу, для яких перепад тиску за формулою Дарсі-Вайсбаха:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\rho V_d^2}{2}. \quad (2)$$

Представляє інтерес визначення питомої потужності при течії рідин у геометричних неоднорідностях (місцевих опорах) коротких трубопроводів, в яких, на відміну від довгих, втрати енергії по довжині та місцеві втрати енергії є сумірними між собою [5].

* Національний університет "Львівська політехніка", кафедра гідравліки та сантехніки

Зміна тиску Δp на місцевому опорі [6]

$$\Delta p = \Delta p_I + \Delta p_R, \quad (3)$$

де Δp_I , Δp_R – відповідно необоротні та оборотні складові.

Для розрахунків обираємо раптове розширення поперечного перерізу трубопровода, оскільки в цьому місцевому опорі найбільш повно виявляються особливості відривних течій [7]. При цьому утворюється струмінь рідини в обмеженому просторі (рис.1) [8]. Тоді на ділянці між перерізами $x = 0$ та $x = L$ (рис.2) [9], де L – довжина ділянки місцевого опору, складові зміни тиску

$$\Delta p_I = -(n-1)^2 \frac{\rho V_D^2}{2}; \quad (4)$$

$$\Delta p_R = \frac{\rho(V_d^2 - V_D^2)}{2}, \quad (5)$$

а зміна тиску

$$\Delta p = (n-1) \cdot \rho V_D^2, \quad (6)$$

де n – ступінь раптового розширення потоку, $n = (D/d)^2$; D/d – ступінь розкриття дифузора (раптове розширення поперечного перерізу трубопровода є частинним випадком дифузора з кутом конусності 180°).

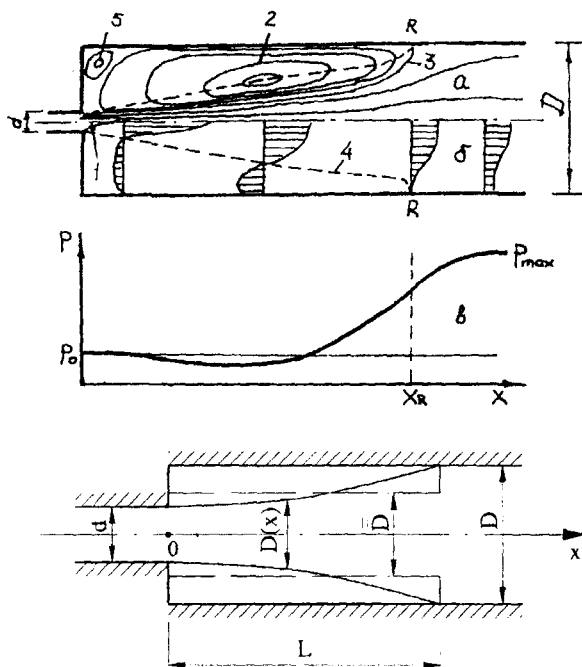


Рис. 1. Картина течії в трубі з раптовим розширенням потоку:
а – лінії течії; б – профілі швидкості;
в – розподіл статичного тиску;
1 – ядро потоку; 2 – область рециркуляційної течії; 3 – розділююча лінія течії; 4 – лінія нульових швидкостей; 5 – вторинний вихор [8]

Рис. 2. Схема моделі струменя рідини при раптовому розширенні потоку [9]

Довжина L припускається [9] рівною довжині ділянки повторного приєднання потоку x_R , для $1,3 \leq D/d \leq 2,5$ [10]

$$x_R = (4,0 \dots 4,5)(D-d). \quad (7)$$

Для обчислення площі поперечного перерізу ω в формулі (1) скористаємося моделлю [9], в якій канал змінного перерізу (раптове розширення поперечного перерізу трубопровода)

замінюється каналом постійного перерізу з діаметром $\bar{D}$ (рис.2), що є середнім за поверхнею струменя рідини,

$$\bar{D} = \frac{d^2 + \frac{2d \cdot (D-d)}{k+1} + \frac{(D-d)^2}{2k+1}}{D}, \quad (8)$$

де $\bar{D}$ – середній діаметр за довжиною струменя,

$$\bar{D} = d + \frac{D-d}{k+1}; \quad (9)$$

k – показник степеня в формулі зміни діаметра

$$D(x) = d + (D-d) \cdot \left(\frac{x}{x_R} \right)^k; \quad (10)$$

x – поточна координата.

Але значення показника степеню k невідоме. Це потребує віднаходження функціональної залежності між k та D/d . Можна припустити, виходячи з геометричних міркувань, що чим менше D/d , тим менше k ; і при $D/d \rightarrow 1$, $k \rightarrow 0$.

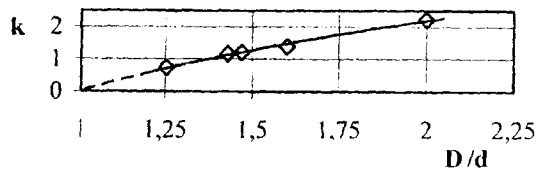
Показник степеня k пропонується визначати, скориставшись профілями осередненої швидкості в області раптового розширення потоку до місця його приєднання. Причому, береться профіль струменя рідини, що обмежений лінією нульових швидкостей (рис.1), оскільки розділююча лінія течії являє собою тонкий зсувний шар, який часто моделюється розривом швидкості в нев'язкому потоці [11] (див., наприклад, [12]). Знімалися координати точок із нульовими швидкостями та проводилася апроксимація на ПЕОМ за допомогою програми CurveExpert1.3 у вигляді формули (10). Розрахунок зведено в табл.1. При цьому обмежилися значеннями $D/d \leq 2,0$, оскільки тенденція до несиметричного приєднання струменя тим більша, чим більше D/d (при збільшенні від 1,223 до 2,323) [13]. Цікаво, що при малих значеннях D/d (згідно з [14] $D/d < 1,72$) розвиток циркуляційної течії відбувається в межах початкової ділянки струменя, що містить ядро потоку [8]. За своїми властивостями ця течія мало чим відрізняється від обтікання оберненого плоского уступа [10].

Таблиця 1

Визначення показника степеню k в законі зміни діаметра

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь розкриття дифузора D/d	Використане джерело	Показник степеня k	Похибка, %, при апроксимації за формулою (1)		
	d	D				d	$(D-d)$	x_R
1.	150,0	188,0	1,253*)	[15]	0,736	- 0,19	+ 10,7	- 15,2
2.	70,0	100,0	1,429	[11]	1,158	- 3,1	+ 15,3	- 8,2
3.	43,2	63,5	1,47	[16]	1,211	- 6,0	+ 17,8	- 5,0
4.	50,0	80,0	1,6	[17]	1,392	- 5,8	+ 13,5	- 3,2
5.	50,0	100,0	2,0	[7]	2,232	- 18,2	+ 20,5	- 1,2

*) обернений уступ

Рис. 3. Залежність $k = f(D/d)$

Коефіцієнт кореляції r при визначенні k за формулою (10) був у межах 0,9488...0,9817.

За даними табл. 1 будувалася графік у координатах $k-D/d$, зображений на рис. 3. Функція $k=f(D/d)$ добре ($r=0,9977$) описується залежністю:

$$k=3,158 \cdot \ln(D/d). \quad (11)$$

Одержана залежність підтверджує висунуте вище припущення про зменшення k зі зменшенням D/d .

Для перевірки адекватності функціональної залежності показника степеню k розраховується значення коефіцієнта раптового розширення $\zeta_{p,p}$ за формулою [9]:

$$\zeta_{p,p} = \frac{4}{\bar{D} \cdot \bar{D} \frac{\rho V_d^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{4(\rho Q)^2}{\rho \pi^2} \cdot \left(\frac{1}{d^2} - \frac{1}{D^2} \right) - \frac{\Delta p}{4} \cdot \left[d + \frac{4d \cdot (D-d)}{(k+1) \cdot (k+2)} + \frac{(D-d)^2}{(2k+1) \cdot (k+1)} \right] \right\} \quad (12)$$

Для визначених за формулою (12) значень коефіцієнтів $\zeta_{p,p}$ знаходилися відхилення від експериментальних даних, наведених у [18 – 20]. Також робилося порівняння з формулою Борда-Карно:

$$\zeta_{p,p} = \alpha_d \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2, \quad (13)$$

де α_d – коефіцієнт кінетичної енергії у трубі діаметром d (рис.1), для області квадратичного опору $\alpha_d = 1,0$.

Розрахунки зведено в табл.2.

Таблиця 2

Визначення коефіцієнта $\zeta_{p,p}$

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь розкриття дифузора D/d	Використане джерело	Коефіцієнт $\zeta_{p,p}$			Відхилення, %, при визначенні $\zeta_{p,p}$ за формулою (12)
	d	D			з графіка	за формулою (12)	за формулою (13)	
1.	20,6	26,0	1,262	[18; рис. 28] досліді Карєва	0,1405	0,1252	0,1386	- 12,2
2.	—	—	1,43	[19; рис.2]	0,2346	0,2602	0,2611	+ 9,8
3.	20,9	35,5	1,699	[20; рис.1,а]	0,45	0,4315	0,427	- 4,3
4.	8,0	14,0	1,75	[18; рис.28] досліді Есканда	0,4385	0,4566	0,4536	+ 4,0
5.	—	—	1,96	[19; рис.2]	0,5389	0,5352	0,5471	- 0,7
6.	26,0	51,0	1,962	[18; рис.28] досліді Карєва	0,5516	0,5356	0,5478	- 3,0

Наведений розрахунок говорить про адекватність функціональної залежності між k та D/d – формула (11). Адже обчислені за формулою (12) значення коефіцієнтів $\zeta_{p,p}$ із використанням k добре описують експериментальні дані. Тільки при $D/d \rightarrow 1$ відповідність експериментальним даним, порівняно з формулою Борда-Карно (13), є гіршою. Це можна пояснити впливом поздовжніх (осьових) градієнтів статичного тиску, які в цьому випадку є сумірними з поперечними (радіальними) градієнтами [10], оскільки останні зі зменшенням величини D/d також зменшуються за рахунок наближення границі струменя до стінок труби [21]. Крім того, k в формулі (11) залежить від співвідношення D/d і не залежить від абсолютних значень діаметрів труб, які утворюють раптове розширення.

Профіль струменя рідини за формулою (10) з використанням (11) відрізняється від профілю струменя [21]

$$D(x) = D - (D - d) \cdot \left(\frac{x}{x_R} \right)^{1/2} \quad (14)$$

тільки в кінці зони розтікання. У дослідженнях [21] границя транзитного струменя знаходилась дуже близько від лінії нульових поздовжніх швидкостей.

У табл. 3 наведено розраховані за формулою (8) значення діаметрів $\bar{D}$ для експериментальних даних [18 – 20]. Там же показано значення середньоарифметичного діаметрів труб, які утворюють раптове розширення.

Таблиця 3

Визначення середнього за довжиною струменя діаметра $\bar{D}$

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь розкриття дифузора D/d	Використане джерело	Діаметр, мм		Похибка, %
	d	D			$\bar{D}$	$1/2 \cdot (d + D)$	
1.	20,9	35,5	1,699	[20]	27,09	28,2	– 4,1
2.	8,0	14,0	1,75	[21]	10,49	11,0	– 2,4
3.	26,0	51,0	1,962	[21]	35,61	38,5	– 8,1

Оскільки $\bar{D} \approx 1/2 \cdot (d + D)$ з похибкою, що не перевищує 10 %, то можна використовувати величину $1/2 \cdot (d + D)$ для розрахунків замість $\bar{D}$.

У табл.4 зведено розрахунок питомої потужності $\bar{W}$ для цих же співвідношень D/d , що й в табл.3. При цьому довжина L ділянки місцевого опору за формулою (7) приймалася рівною $4,25(D-d)$, оскільки дійсна довжина невідома.

Таблиця 4

Визначення питомої потужності $\bar{W}$

Ч/ч	Ступінь розкриття дифузора D/d	Питома потужність $\bar{W}$, кДж/(м ³ ·с), визначена за діаметром		
		d	D	$1/2 \cdot (d + D)$
1.	1,699	46,625	1,305	219,596
2.	1,75	984,612	22,530	3758,461
3.	1,962	0,7102	0,00752	1,268

Як видно з табл.4, питома потужність при течії рідини крізь раптові розширення труб більша, ніж при течії в циліндричних трубах. Це можна пояснити переважним опором форми (тиску) над опором сил тертя за рахунок деформації профілей швидкостей при раптовому розширенні потоку [2].

Наведений розрахунок показує можливість визначення втрат енергії в місцевих опорах трубопроводів за величиною питомої потужності. Це дає змогу точного обчислення споживаної електродвигуном потужності при перепомповуванні рідин і газів у трубопровідних системах зі значними місцевими втратами енергії.

1. Струминский В.В. Введение // Проблемы турбулентных течений. - М.: Наука, 1987. - С.3-8.
2. Повх И.Л., Финошин Н.В. Гидродинамика труб переменного сечения // ИФЖ. - 1992. - Т.62, № 4. - С.525-533.
3. Мартыненко О.Г., Ганжа В.Л. О подходе к проблеме энергосбережения в БССР // Проблемы взаимосвязанного тепло- и массопереноса: Сб. науч. тр. - Минск: ИТМО АН БССР, 1989. - С.5-8.
4. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. - Л.: Машиностроение, 1976. - 504 с.
5. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А.Большакова. - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. - 343 с.
6. Хьюит Дж., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения / Пер. с англ. - М.: Энергия, 1974. - 408 с.
7. Будонов Н.Ф., Шахин В.М. Закрученное течение в круглой трубе переменного сечения при наличии отрыва // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. - 1971. - № 13, вып.3. - С.6-13.
8. Турбулентные струйные течения в каналах / В.Е.Алемасов, Г.А.Глебов, А.П.Козлов, А.Н.Щёлков. - Казань: Казанский филиал АН СССР, 1988. - 172 с.
9. Иньков А.П., Ярхо С.А. К расчету местных коэффициентов гидравлического сопротивления // Науч. тр. Всес. заочн. машиностроит. ин-та. - 1973. - Вып.9. - С.167-176.
10. Турбулентность / П.Брэдишоу, Т.Себеси, Г.-Г.Фернгольц и др.; Под ред. П.Брэдишоу. - М.: Машиностроение, 1980. - 343 с.
11. Тузон. Устойчивость искривленной разделяющей линии тока // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. - 1977. - № 3. - С.267-268.
12. Мун, Рудингер. Распределение скорости в канале круглого сечения с внезапным расширением // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. - 1977. - № 1. - С.326-332.
13. Земаник, Дугалл. Местный теплообмен за участком резкого расширения круглого канала // Теплопередача: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. - 1970. - № 1. - С.54-62.
14. Ктальхерман М.Г. Исследование турбулентных отрывных течений в канале, структура потока и теплопередача: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ИТПМ СО АН СССР. - Новосибирск, 1970.
15. Фогель, Итон. Комбинированные измерения теплоотдачи и гидродинамических характеристик за обратным уступом // Теплопередача: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. - 1985. - № 4. - С.152-159.
16. So R.M.C., Yu M.H., Otugen M.V., Zhu J.Y. Rotation effect on inhomogeneous mixing in axisymmetric sudden-expansion flows // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1987. - Vol.30, № 11. - P.2411-2421.
17. Weiser N., Bartsch P., Nitsche W. On Turbulent Flow Separation in Axisymmetric Diffusers // Engineering Turbulence Modelling and Experiments: Proc. Symp. Model. and Measur. held. - Sept. 24-28, 1990. - Dubrovnik, Ygoslavia, 1990. - P.227-236.
18. Альтишуль А.Д. Местные гидравлические сопротивления при движении вязких жидкостей. - М.: Гостоптехиздат, 1962. - 116 с.
19. Альтишуль А.Д., Арзуманов Э.С., Везирян Р.Е. Экспериментальное исследование зависимости коэффициента сопротивления при внезапном расширении потока от числа Рейнольдса // Нефтяное хозяйство. - 1967. - № 4. - С.53-55.
20. Иванюта Ю.Ф., Чекалова Л.А. Исследование влияния добавок полимера на величину коэффициента местного сопротивления // ИФЖ. - 1974. - Т. XXVI, № 6. - С.965-971.
21. Горелов Г.М., Трянов А.Е. Течение при внезапном расширении канала // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1970. - № 3. - С.54-62.